寄稿

SYSTEM 安全管理

尹 邦 洪
(금호석유화학주식회사 안전과장)

〈편집자 註〉

안전은 인간과 잠시라도 떨어져 있을 수 없다. 그것은 인간은 안전한 환경에 처해 있을때에만 인간의 정상적 활동이 가능하기 때문이다.

사고는 반드시 불안전요소가 기인하여 발생된다. 그러므로 불안전요소를 제거하면 안전을 기할 수 있다. 불안전요소를 정확하게 찾아내어 대책을 세우는 Technical Pattern의 하나로 System 안전을 익힐 필요가 있다.

본고는 공장의 전체적, 일반적인 현상으로부터 재해요인을 찾아, 대책을 수립하는 기본적 방법을 확립하기 위하여 System 안전을 현장에 적용, 관리하는 것을 목적으로 연구하였다.

1. 이 론

가. System 安全의 意義

산업재해는 그 원인을 구명해 보면, 일견 단순한 것처럼 보이지만 자세하게 조사해 보면 여러가지 원인이 상호 연관되어 재해를 발생시키는 예가 많다.

특히 근년에 자동화기술, 정보화기술의 진전에 따라 생산 System이나 운반 System이 대형화, 복잡화 됨으로써 사소한 기계 고장이나 작업자의 적

은 실수가 증폭되어 연쇄적으로 대형재해의 결과를 초래하는 예가 적지 않다.

이와 같은 소위 System 안전에 대하여는 단순한 개개의 재해요인에 대한 대책뿐만 아니라 System 내에서 발생할 우려가 있는 재해를 미리 예측하여 그러한 재해요인들 간의 상호관련성을 재해와 연결시켜 해명하는 방법으로 총합적 안전대책을 강구할 필요가 있다.

종래의 개개의 기계, 설비, 작업 등의 각 요소에 대한 안전을 요소안들이라 한다면, System 전체에 대하여 Balance를 취하여 안전을 확보하는 것이 System 안전이다.

요소안전은 각각의 요소에 걸려 있는 개개의 재해원인을 규명하여 결함을 찾아내고, 그 대책을 강구하는 것으로써 개개의 재해방지에는 효과적이지만 이것만으로는 System 재해요인을 빠짐없이 Check 하기는 어렵다.

개개의 문제로부터 이것을 추상적으로 일반화시켜 기본 원리를 찾아내고, 이것을 근거로 하여 System 안전을 위한 이론과 수법을 개발하고 그 결과를 다시 조사하여 실제의 System에 적용함으로써 비로소 System 재해를 방지하게 된다.

이와 같은 기본원리에 근거한 안전과학을 System 안전과학이라고 할 수 있다.

나. System 안전의 유래

안전의 역사는 사고의 역사라고 바꾸어 말할 수 있다. System 안전은 Missile개발 과정에서 발생된 사고에서 비롯 되었다.

1950년대 후반 미국에서는 동서의 긴장과 소련의 우주기술 발달에 대응하여 핵탄두장비용 미사일 병기 개발에 박차를 가하였다.

개발기간을 단축시키기 위하여 개발에 필요한 구상, 설계, 제조, 운용의 각 단계를 병행하여 추진시키는 병행개발 방식이 채택되었다.

많은 수정과 반복작업이 있을 것으로 생각되어 거기에 드는 비용도 증대될 것으로 처음부터 예상하였다.

그당시 System 안전공학은 아직 일반에게 알려져 있지도 않았고 안전성은 설계자나 기술자 각개인에게 맡겨져 있었다.

이 Project는 시작후 1년6개월도 못되어서 연속 4회의 대형사고가 발생되었고 미사일 지하격납 발사기지 개발과정에서 수백만불의 손해를 보게 되었다.

사고조사 결과 근본적으로 시정하지 않으면 안될 몇가지 중대한 안전상의 결함이 밝혀졌다. 그러나 이러한 결함을 시정하려면 처음부터 다시 시작하지 않으면 안되며 엄청난 경비와 시간을 소요하게 되어 결국 많은 비용이 투입된 이 미사일 System 은 개발 후 2년을 경과하지 못하고 폐기될 운명이 되었다.

이리하여 처음으로 System 안전의 중요성이 인식되었고, 1962년 4월에 System 안전에 관한 최초의 미군 사양서 「공군 탄도미사일 개발을 위한 System 안전공학」이 공표되었고, 그해 9월에 System 안전을 독립된 계약항목으로 하여 「병기 System 안전기준 WS 133B」를 정하게 되었다.

이것이 미국 최초의 미사일 병기인 미니트맨 미사일 개발에 공헌한 안전 System이었다.

그 후 System 안전은 전미군 장비의 필요조건이 되었고, 그 규격도 수차의 개정을 거쳐 1977년 6월 MIL-S-882A 「System Satety Program Requirements」로 되어 오늘에 이르게 되었다.

한편으로는 안전의식의 고양과 소비자를 보호하자는 뜻에서 제품안전(Production Safety)을 기해야 한다는 여론이 높아지고 있다.

법이론으로도 제조자의 1. 과실, 2. 보증위반, 3. 엄격한 책임 등의 사항을 피해자가 제조자의 과실이나 계약위반을 입증할 수 없어도 제품에 무엇인가 결함이 있다는 것을 나타내 보이기만 하면 그것만으로 제조자가 책임을 지지 않을 수 없도록 하는 엄격책임 이론이 주류를 점하게 되었다.

이러한 점에 대처하여 안전성이 높은 제품을 개발하기 위하여는 계획에서부터 운용에 이르는 각 단계에서 System 안전을 적용해야 할 필요가 생기게 되었다.

System 안전이 개발된 후 System 안전해석 수법이 산업안전 분야에도 적용되기 시작하였다.

System 안전에서 사용되는 용어의 정의는 대략

다음과 같다.

○安全 : 사람의 사망, 상해 또는 설비나 재산상의 손해 또는 상실의 원인이 될 수 있는 상태가 전혀 없는 것.

○災難 : 사람의 사망, 상해 또는 설비나 재산상의 손실 또는 상실에 배착되는 결과로써 계획되지 않은 사상.

○Hazard : 재난으로 배착될 우려가 있는 현재, 또는 잠재상태. (예 : 바람직하지 못한 장소에 연료를 방치하는 것은 실제로 연료가 없는 경우에도 Hazard이다.)

○Hazard 確率 : 정량 또는 정성적인 언어로 표현시킨 것으로써 Hazard가 발생되기 쉬운 정도.

○Hazard 強度 : 결국은 일어날지도 모르는 상해, 직업병, 재산 또는 설비의 손해의 정도에 따라 정의된 최악의 잠재적 결과를 정성적으로 평가한 것.

○危險(Risk) : Hazard 확률 및 Hazard 강도로 나타날 가능이 있는 손실.

○System : 복잡한 정도에 관계없이 인간, 재료, 기계, 설비, 시설 및 소프트웨어 등으로 구성되어 그것들이 상호 관계를 가지면서 정해진 조건을 기초로 하여 주어진 일을 수행하거나, 또는 필요로하는 사명을 달성하기 위하여 작용하는 집합체.

○System 安全管理 : System안전을 전체 Program 요건과 모순없이 달성하기 위하여 System 안전 Program 요건을 설정하고 업무활동 계획, 실행 및 달성을 확보하기 위한 관리업무의 1요소.

다. F.T.A.

(1) F.T.A.의 특징

F.T.A.(Fault Tree Analysis) : F.T.A. (Block Diagram의 모양이 마치 나뭇가지를 거꾸로 늘어뜨린 모양과 비슷하여 결함수법 또는 결함관련수법이라고 한다)는 다른 여러가지의 System 해석수법이 재해원인에서 출발하여 재해현상에 치달하는 소위 귀납적 해석방법인 것에 비하여 역으로 정상사상이라고 하는 재해현상으로부터 출발하여 기본사상이라고 하는 재해원인을 향하여 연역적 해석을 하는데 큰 특징이 있다.

그렇기 때문에 해석 전에는 예측하지 못했던 재해현상과 재해원인과의 연결된 점을 명확하게 가져낼 수 있다. 또 F.T.A.는 基本事象의 발생확률을 이용하여 頂象事象의 발생확률을 나타내는 정량적 해석이 가능하다. 그러나 필요에 따라서는 정성적 해석으로 그치거나 재해의 직접원인만 알아내는데 그치는 해석을 할 수도 있다. 역으로 복잡한 시스템을 상세하게 해석할 수도 있어서 매우 융통성이 많다.

(2) F.T.A.의 순서

① 정성적 F.T(Fault Tree)의 작성단계

해석하고자 하는 재해를 결정하고 이것을 F.T에 표시하기 전단계로서 세부내용은 다음과 같다.

a. 해석하고자 하는 시스템의 공정과 작업내용을 충분히 파악한다.

b. 예상되는 재해를 과거의 재해사례와 재해통계를 기초로 하여 가능한대로 광범위하게 조사한다.

c. 재해의 강도, 빈도, 시스템에 미치는 영향 등을 검토하고, 해석대상으로 삼는 재해를 결정한다.

d. 재해와 관계있는 기계 등의 불량상태나 작업자의 error에 관하여 그 원인과 경향을 가능한 한 상세하게 조사한다.

e. F.T를 작성한다.

② F.T의 정량화 단계

작성된 F.T를 수식화하여 재해의 발생확률을 계산하는 단계이다.

a. 해석하고자 하는 재해의 발생확률 목표치를 위험도, 동종시스템의 수, 외부에 대한 영향 등을 고려하여 정한다.

b. 작성된 F.T를 수식화하여 수치로 간소화 한다.

c. 재해의 원인이 되는 기계 등의 불량상태나 작업자의 에라발생 확률을 조사하거나 자료에서 구한다.

d. c의 수치를 수식화된 F.T에 맞춰 재해발생 확률을 계산한다.

e. d의 결과를 과거의 재해나 중간적 사고의 발생률과 비교하여 필요하면 ①의 d에 되돌려 재검토한다.

③ 재해방지 대책 수립단계

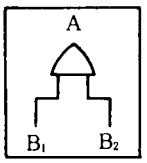
a. 재해의 발생 확률이 목표치를 상회할 때는 중요도를 검토하여 가장 유효한 시정수단을 검토한다.

b. 그 결과에 따라 F.T를 수정하고 재해석을한다. 필요하면 a, b를 반복한다.

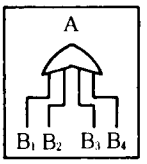
c. Cost나 기술 등 여러가지 조건을 고려하여 가장 적절한 재해방지 대책을 세우고 그 효과를 F.T.A.에서 재확인 한다.

(3) F.T의 기호

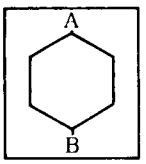
F. T. A. Diagram에서 가장 많이 사용되는 기호는 다음과 같다.



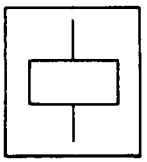
AND gate (論理積) : B_1과 B_2의 事象이 동시에 만족될 때에만 A의 事象으로 진행될 수 있다.



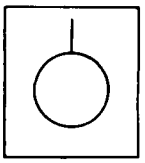
OR gate (論理和) : B_1, B_2, B_3, B_4중에 어느 한가지 사상만 만족되면 A의 사상으로 진행된다.



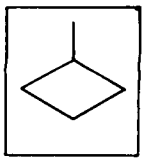
억제(Inhibit) gate : B와 A 사이의 상태에 따라 A의사상에 큰 영향을 끼칠 수 있는, 진행상의 과정상태.



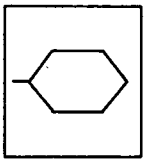
欠陷事象



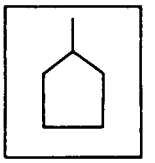
基本事象



이하생략 欠陷事象



論理修正記號(條件記號)



通常 있을 수 있는 事象

〈그림 1〉

(4) F.T 작성

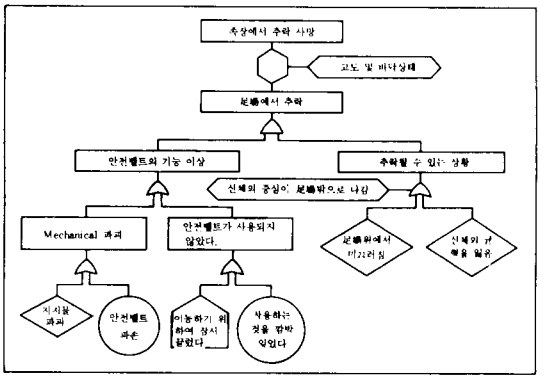


그림 2. 足場에서 추락사고로 인한 재해 F.T

(5) F.T의 정량

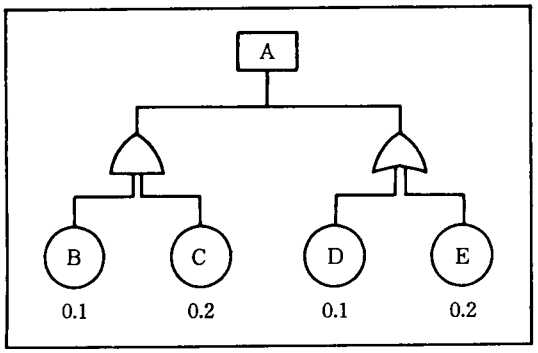
위에서 작성한 F.T에는 각각의 사상에 기호를 붙여, 이것을 이용하여 정상사상으로부터 순차적으로 AND는 적, OR는 화로 하여 하단의 사상에바꾸어 놓고 최후에 기본사상(여기서는 통상, 생략사상 등을 포함하여 생각한다.)만으로 정상사상을 나타내는 수식을 작성한다.

확률사상의 적과 화

AND GATE(論理積의 確率) $= qA \cdot qB \cdot qC \cdots\cdots qN$

OR GATE(論理和의 確率) $= 1-(1-qA)(1-qB)\cdots\cdots(1-qN)$

이상의 확률사상 계산식을 이용하여 정상사상의 확률계산식을 작성하고 여기에 기본사상의 발생확률 수치를 대입시켜 정상사상의 확률을 계산한다.



B, C, D, E의 사상에 각각 0.1, 0.2, 0.1, 0.2의 확률수치를 부여한다면 A의 확률은 얼마가 될 것인가?

A의 확률을 QA라 하면

$QA = (0.1 \times 0.2) \times [1 - (1-0.1)(1-0.2)]$

$QA = 0.02 \times [1 - 0.72]$

$QA = 0.02 \times 0.28$

$QA = 0.0056$

∴ 정상사상 A의 재해가 발생될 확률은 0.0056

2. System 안전의 실례적용

가. 재난사례

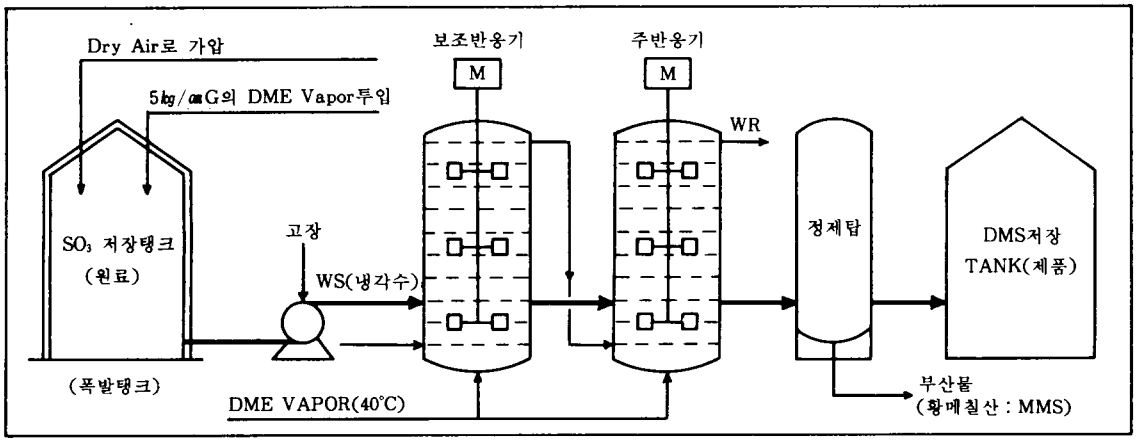
○일　　시 : 1986. 12. 17. 01 : 05시

○장　　소 : 여천 석유화학공단 L공장

○재해개략 : DMS (Dimethyl Sulfate : 농약원료) 제조공정 중 무수황산(SO_3) 탱크 1기 폭발 및 주변설비 파손으로 근무자 1명 사망, 1명 부상, 인근마을주택 다수 파손 및 주민 대피소동.

나. 공정개략 및 Chemical 특성

(1) 공정약도



〈그림 3〉 DMS 생산 Process 약도

(2) 공정에 투입되는 Chemical 특성

공정중의 용도	화학명	인화점	발화점	폭발한계	융점
원료	무수황산 (Sulphuric Anhydride) SO_3				r형 16.8℃
부원료 검 제품	DME(Dimethyl either) $(CH_3)_2O$	-40℃	350℃	3.45~26.7 Vol%	
제품	DMS(Dimethyl Sulfate) $(CH_3)_2SO_4$	84℃	188℃		-31.8℃

○無水黃酸

용도 : 유기화합물의 Sulfon화

성상 : 분자량 : 80.07 α, β, γ의 3 형체가 있다. γ형은 얼음덩어리 모양 또는 액체.

비중 : 1.92

건조한 것은 금속에 침투하거나 산성반응을 나타내지 않으나 공기와 접촉하면 습기를 흡수하여 진한 자색 연기를 낸다. 물과 급격히 반응하여 황산이 된다.

위험성 : 목재와 접촉하면 탈수반응을 일으켜 발

열에 의하여 화재를 일으킨다. 酸化劑.

유독성 : 피부자극.

위험물 구분 : 제 6류 - 무수황산.

○DME (Dimethyl ether)

용도 : 냉매, 용제, 특수연료

분자량 : 46. 07

비중 : 1.617 (공기 = 1) 0.661 (액)

비점 : -23. 6℃ 융점 : -141.5℃ 무색기체로물, 알콜, 가소린, 각종 유기용제에 잘 녹는다.

위험성 : 화재, 폭발의 위험성이 크다

유독성 : 에틸에테르와 같은 마취성, 액체상태로 피부에 닿으면 동상의 위험이 있다.

취급주의 : 화기 엄금.

○DMS (Dimethyl Sulfate)

용도 : 유기화합물의 Methyl화 제, 의약품 합성

성상 : 분자량 : 162. 13 비중 : 1.3332 (15℃) 무색 유상의 액체. 에테르, 아세톤, 방향족 탄화수소에 녹는다.

유독성 : TLV : 1ppm 피부에 흡수된다.

취급주의 : 극물, 위험물, Ⅳ-3 밀폐된 냉암소에 저장.

다. 사고의 배경

(1) 최초의 설계 및 운전조건

① 무수황산 저장탱크

○제작 : 1973년 영국 Robert Jenkins社

○Tank Specifications

Capacity : 약 60M³

재료 : 11mm SUS 304 (Roof and Bottom) 10mm SUS 304 (Wall) 내부는 TP 304 강철로 부식방지 라이닝이 되었다. Test Pressure : 10. 86 kg / cm²

② SO_3를 액상으로 유지하는 방법

무수황산(SO_3)은 16. 8℃ 이하에서는 얼음 모양의 고체이므로 이것을 액체상태로 유지하기 위하여 저장탱크는 Steam으로 덥혀 16. 8℃ 이상의 온도를 유지하도록 보온시설이 되어 있다.

③ 저장탱크로부터 Process에 원료 투입방법 : Pump 사용

④ 주반응

$$(CH_3)_2O + SO_3 \rightarrow (CH_3)_2SO_4$$

$$48 : 80 \rightarrow 126\,DMS$$

발열반응

주반응에서 96~98Wt%의 반응이 일어난다.

부반응은 SO_3 저장 Tank에서 일어난 반응이 아니므로 생략한다.

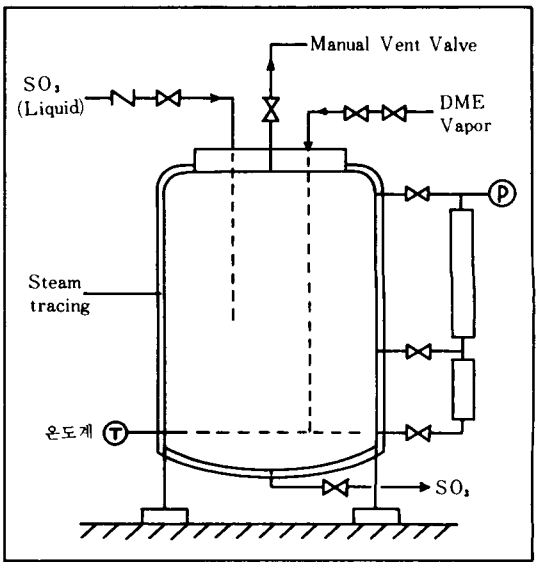
⑤ 반응장치 (Reactor)

충분히 습기가 제거된 무수황산을 서서히 반응기에 밀어 넣으면서 여기에 40℃ 정도의 DME Vapor를 아래로 넣어 기포를 일으키면서 Agitator를 가동시켜 충분히 반응 되도록 혼합시킨다. 이 때 발열반응에 의하여 발생된 열은 냉각수 순환장치에 의하여 제거되고 온도는 90°~110℃로, 압력은 1 kg / cm² G 정도로 유지해야 한다.

(2) Tank 개조 및 운전방법 변경

① 저장Tank겸 Pre-Reactor로 사용 Tank내의 SO_3를 액상으로 유지하기 위하여 16. 8℃ 이상의 온도 유지에 필요한 열을 얻는 방법으로 값비싼 증기가열 보온방법을 중단하고 저장탱크에 DMEVapor를 투입함으로써 저장탱크에서 예열반응을 일으켜 그 반응열을 이용하였다

이 방법은 어찌 생각하면 증기 사용료를 절감하



〈그림 4〉 폭발한 SO_3 Tank

고 반응시 반응시간도 단축시키는 이중효과를 얻을 수 있다고 생각되지만 매우 위험한 발상이라고 생각된다.

② 원료 투입방법

반응기에 SO_3를 투입하는 Pump가 부식으로 자주 고장이 나자 Pump 수리를 포기하고 저장탱크의 통기관에 Dry Air line을 연결하고 Air Compressor로 가압하여 공기압력으로 중질물을 반응기에 넣었다. 이 과정에서 예열반응으로 생성된 SO_3증기와 DME Vapor와 공기의 혼합가스가 DME의 폭발범위(3.45~26.7 Vol %)를 조성할 수 있는 충분한 조건이 형성될 수 있다.

③ 운전방법

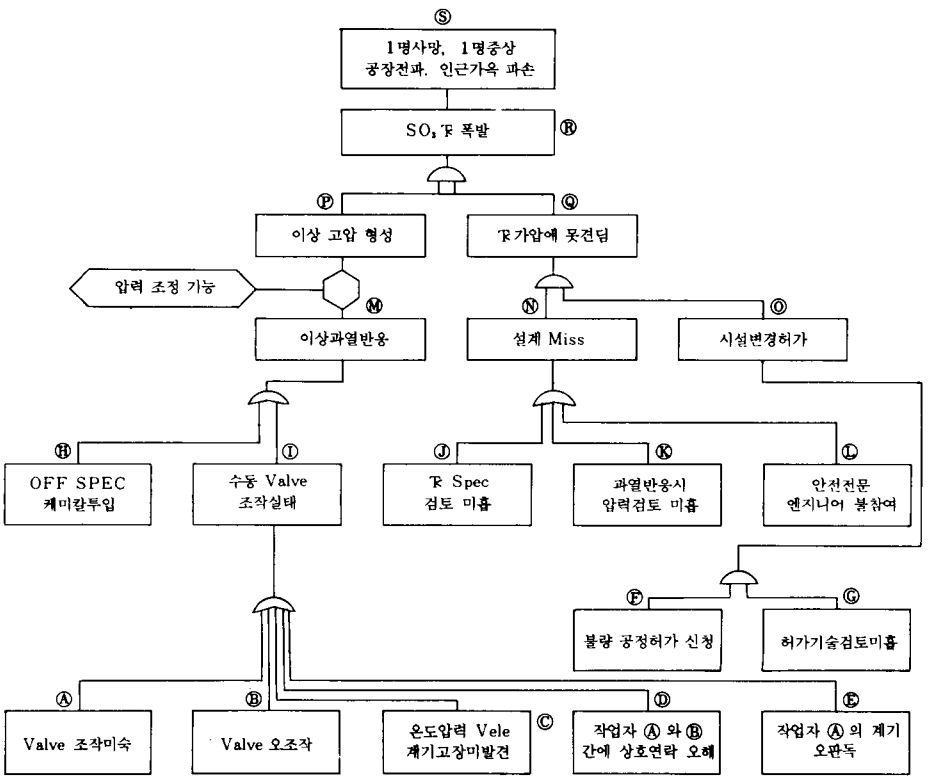
SO_3저장탱크를 Pre-Reactor로 이용하게 되었으므로 반응기로써의 적정 온도와 압력을 유지하지 않으면 안된다. 이때 온도유지 방법은 DME Vapor 투입량으로 조정 하였고 압력유지 방법으로는 Vent Valve의 개도로써 조정 하였다. 즉 DME 투입을 많이 하면 반응이 활발하여져 온도가 상승하고 투입량을 줄이면 반응이 적어져 온도를 내릴 수 있다.

압력유지 방법 역시 Vent Valve를 많이 열면 탱크 내부 압력이 떨어지고 Valve를 닫으면 압력이 올라간다.

이와 같은 방법으로 SO_3 저장 Tank의 적정온도(90°~110℃)와 압력(1kg/㎠ G)을 유지 하였다. 이 운전은 2명의 작업자로 편성되어 작업자Ⓐ가 온도계와 압력계를 지켜보며 결성으로 알려주면 작업자 Ⓑ 가 수동으로 Valve를 조작 하였다.

이와같은 방법으로 적정 온도와 압력을 유지한다는 것은 매우 어렵다.

라. F.T.A.해석



〈그림 5〉 SO_3 Tank 폭발 F.T.A.

※ 예방대책

1. Ⓜ의 ⬡에 Pressure Control Regulator 설치.

2. Ⓗ에서 ON Spec케미칼 엄격판정 및 Ⓘ에 Auto Supply System설치

3. Ⓝ 세계적으로 인정 받은 Process Design 채택

4. Ⓖ 허가기관에서 권위있는 연구기관에 기술검토 의뢰(허가 System 법률보완)

마. 사고의 결정적 원인

그림 5로부터 다음과 같은 사고 원인을 가려낼 수 있다.

(1) Ⓕ Ⓖ로부터 원료 저장 목적으로만 사용 하여야할 저장 Tank를 반응기로 겸용하려는 불량한 공정시도 및 그에 따른 허가 검토기술이 부족하였다.

(2) 원료 저장탱크의 온도를 17℃ 이상 유지하는 방법으로 증기를 사용하도록 되어 있는데도 증기값을 절감할 목적으로 저장 Tank에 직접 DME를투입함으로써 자체 반응열을 이용하여 Tank 온도를 유지하려 하였다.→Ⓝ 공정설계 Miss

(3) Ⓗ에서 운전 Manual로 정한 DMS를 투입하지 않고 DMS보다 반응효과가 빠른 DME를 투입하였다. Ⓘ에서 DME 투입방법 마저 수동 발브조작으로 적정량 투입이 불가능했다.

(4) Tank에 이상압력이 형성되지 않도록 Pressure Control할 수 있는 Regulator나 또는 이상고압 형성시 압력을 제거해 주는 Safety Valve가 단 한 개도 설치돼 있지 않았다.→⬡ Inhibitor System 전무.

(5) 발열반응이 일어나고 있는 Tank에 Dry Air로 가압 함으로써 DME의 폭발범위(3.45~26.7Vo%)를 충분히 형성시킬수 있는 조건이 되었고, 정확한 것은 SO_3와 DME의 반응열량을 산출하여 불씨가 될 수 있는 열과 온도를 계산해 내는 것이 정확한 분석이 되겠으나 당시의 상황으로 추정하여 자체 반응열에 의한 급격한 온도 상승과 그에 따른 압력 상승으로 인한 폭발로 생각할 수 있다.

3. 결 론

어떤 재해를 막론하고 사고의 원인을 정확히 밝혀내면 거기에 대한 대책은 어렵지 않게 세울수 있다. 문제는 사고의 원인을 어떤 방법으로 정확히 밝혀서 그 원인 자체를 제거하느냐 하는 것이다.

F.T.A. System은 전반에 걸쳐 사고의 Point 즉 맥을 잡아 안전관리를 할 수 있는 좋은 방법이다. 안전관리 뿐 아니라 모든 부문에 활용 가능한 F.T.A. 방법이 널리 활용될 수 있기를 바란다. *

〈참고문헌〉

1) 消防技術情報 14號(한국소방안전협회)

2) 産業安全 핸드 북(일본 중앙노동재해 방지협회)

3) 有害化學品 處理取扱 Manual(The International Technical Information Institute)

4) Hazardous Chemicals Data Book

5) 消防法令集(대한소방공론사) 其他 數種

화재는 한순간 후회는 한평생